

Estimation de l'encrassement dans les échangeurs thermiques

Sabrina DELROT^{1,2,3}, Krishna BUSAWON⁵, Mohamed DJEMAI^{1,2,3}, François DELMOTTE^{1,4}

¹Univ Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

²UVHC, LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

³CNRS, FRE 3304, 59313 Valenciennes, France

sabrina.delrot@univ-valenciennes.fr, mohamed.djemai@univ-valenciennes.fr,

⁴LG2IA, Faculté des Sciences Appliquées, TechnoParc Futura, 62400 Béthune, France

francois.delmotte@univ-artois.fr

⁵Northumbria University

School of Computing, Engineering and Information Sciences

Newcastle Upon Tyne, NE1 8ST, UK

Cedex 9, France

krishna.busawon@northumbria.ac.uk

Résumé— Ce papier développe un observateur non linéaire pour un échangeur thermique. L'objectif visé est de pouvoir estimer et détecter l'encrassement dans les échangeurs thermiques et plus précisément les paramètres relatif à l'encrassement. Nous présentons en premier lieu le modèle de l'échangeur thermique et en second lieu un observateur non linéaire y est développé. Une fonction de Lyapunov non quadratique a du être construite pour prouver la convergence de l'erreur d'estimation.

Mots-clés— Echangeur thermique, encrassement, observateur non linéaire, Estimation.

I. INTRODUCTION

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant la récupération de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre. Dans l'échangeur thermique, un transfert de température s'effectue entre un liquide chaud et un liquide froid sans contact entre ces deux liquides qui circulent le long d'une paroi de séparation. Nous considérons ici un échangeur tubulaire avec une circulation à contre-courant des deux fluides représenté sur la figure 1.

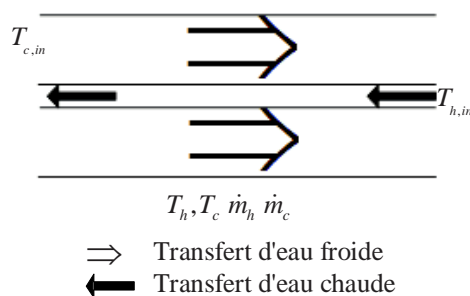


Fig. 1 : Représentation du système réel : échangeur thermique

Nous noterons :

$T_{h,in}$: Température du fluide chaud en entrée de l'échangeur

$T_{c,in}$: Température du fluide froid en entrée de l'échangeur

\dot{m}_h : Débit massique du fluide chaud

\dot{m}_c : Débit massique du fluide froid

T_h : Température du fluide chaud de l'échangeur

T_c : Température du fluide froid de l'échangeur

Par la suite si h et c sont employés pour représenter respectivement les fluides chaud et froid.

Le fait que ces fluides chaud et froid soient en sens inverse permet un échange de chaleur régulier.

Les transferts de chaleur dans les échangeurs thermiques sont favorables au développement des phénomènes d'encrassement dans les liquides et sur les parois thermiques, ce qui provoque alors des perturbations. L'encrassement peut provoquer de la corrosion, une augmentation des dépenses énergétiques... [8]

L'encrassement est actuellement toujours mesuré à l'aide de capteurs, de sondes qui sont coûteux. Le fait de savoir mesurer l'encrassement permet d'adapter des programmes d'entretiens et de minimiser les coûts d'entretien. Il est donc préférable de savoir le mesurer ou de l'observer afin de prévenir et d'agir en conséquence.

L'estimation d'encrassement dans les échangeurs thermiques est un problème à part entière, en effet sachant que le modèle de l'échangeur thermique est non linéaire, il est difficile actuellement encore de l'estimer précisément. Plusieurs méthodes ont été appliquées à ce problème d'estimation telle que le filtre de Kalman étendu [6], le réseau de neurone [7] et l'utilisation d'un modèle flou [1]. Ce papier illustre une solution utilisant un observateur avec une construction décomposée en plusieurs parties permettant d'améliorer les résultats déjà trouvés sur l'encrassement.

II. LE MODELE DE L'ECHANGEUR THERMIQUE

Le modèle du système défini par [6] est utilisé tout au long de l'étude des systèmes non linéaires. Il est représenté par les deux dérivées partielles suivantes :

$$\begin{aligned} \rho \bar{A}_h c_h \frac{dT_h(t,x)}{dt} + \rho \bar{A}_h c_h v_h \frac{\partial T_h(t,x)}{\partial x} = \\ A_h U(t) [T_c(t,x) - T_h(t,x)] \\ \rho \bar{A}_c c_c \frac{dT_c(t,x)}{dt} + \rho \bar{A}_c c_c v_c \frac{\partial T_c(t,x)}{\partial x} = \\ A_c U(t) [T_h(t,x) - T_c(t,x)] \end{aligned} \quad (1)$$

et $T_c(t,0) = T_{c,in}$; $T_h(t,0) = T_{h,in}$

Avec :

A_h représente l'aire de la surface de convection, alors que \bar{A}_h et \bar{A}_c représentent les aires de la section traversées par le flux, U le coefficient de transfert de chaleur globale, v la vitesse du flux, ρ la densité, c la capacité de chaleur.

Un modèle à état fini peut être obtenu par discrétisation [5]. Nous considérons une seule section pour le moment, l'équation (1) donnera :

$$\begin{cases} M_h c_h \frac{dT_{h,1}(t)}{dt} = \\ \dot{m}_h(t) c_h [T_{h,in}(t) - T_{h,1}(t)] - A_h U(t) \Delta T(t) \\ M_c c_c \frac{dT_{c,1}(t)}{dt} = \\ \dot{m}_c(t) c_c [T_{c,in}(t) - T_{c,1}(t)] - A_c U(t) \Delta T(t) \end{cases} \quad (2)$$

avec : $\Delta(t) = T_h - T_c$; $M_h = \rho \bar{A}_h$; $M_c = \rho \bar{A}_c$;

$\dot{m}_h(t) = \rho \bar{A}_h v_h(t)$ et $\dot{m}_c(t) = \rho \bar{A}_c v_c(t)$ et

$$\frac{\partial T_{h,i}}{\partial x} = \frac{T_{h,i} - T_{h,i-\Delta x}}{\Delta x} = T_{h,i} - T_{h,i-1};$$

et M représente la masse pour le fluide chaud ou froid.

On peut ensuite mettre l'équation (2) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{T}_{h,1} \\ \dot{T}_{c,1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) / \tau_h & \frac{\alpha}{2\tau_h} \\ \frac{\beta}{2\tau_h} & -\left(1 + \frac{\beta}{2}\right) / \tau_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{h,1} \\ T_{c,1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) / \tau_h & \frac{\alpha}{2\tau_h} \\ \frac{\beta}{2\tau_h} & \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) / \tau_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{h,in} \\ T_{c,in} \end{pmatrix} \quad (3)$$

avec

$$\alpha(t) = \frac{A_h U}{\dot{m}_h(t) c_h} ; \tau_h(t) = \frac{M_h}{\dot{m}_h(t)} ; \beta(t) = \frac{A_c U}{\dot{m}_c(t) c_c} ;$$

$$\tau_c(t) = \frac{M_c}{\dot{m}_c(t)} ;$$

$\alpha, \beta, \tau_h, \tau_c$ sont les paramètres du modèle.

Si on l'on veut passer d'une section à plusieurs sections, les sorties de la section précédente deviennent les entrées de la section suivante.

Pour la modélisation, [5] a montré qu'il était suffisant de découper le processus en deux sections (même si l'on pourrait augmenter le nombre de sections), en supposant l'homogénéité à l'intérieur de chacune des quatre zones ainsi définies comme le montre la figure 2.

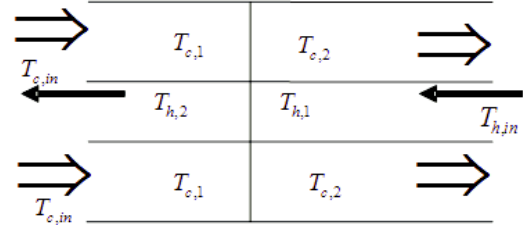


Fig. 2 : Échangeur thermique avec deux sections.

Sous ces hypothèses, le modèle obtenu sera mis sous forme d'équations différentielles ordinaires et sera finalement modélisé sous la forme vue ci-dessous.

Les variables d'entrées sont les températures et débits des fluides (ici de l'eau) chaud et froid : $u = [T_{h,in} \ T_{c,in} \ \dot{m}_h \ \dot{m}_c]^T$

Le vecteur d'état complet du système est représenté par : $x = (T_{h,1} \ T_{h,2} \ T_{c,1} \ T_{c,2} \ \alpha^* \ \beta^*)^T$

où α^* et β^* sont les paramètres dépendants de l'état d'encrassement à estimer.

On considère que ces deux paramètres varient lentement dans le temps et donc que leurs dérivées seront nulles.

Le modèle physique du système est donc représenté sous la forme suivante en n'utilisant que deux sections.

$$\frac{dx}{dt} = A(z,u)x + B(z,u) \quad (4)$$

avec :

$$z = [\alpha^*, \beta^*]$$

$$A(z,u) = \begin{bmatrix} -c_h - c_\alpha & 0 & c_\alpha & c_\alpha & 0 & 0 \\ c_h - c_\alpha & -c_h - c_\alpha & c_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ c_\beta & c_\beta & -c_\alpha - c_\beta & 0 & 0 & 0 \\ c_\beta & 0 & c_\alpha - c_\beta & -c_\alpha - c_\beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B(z,u) = \begin{bmatrix} c_h - c_\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & c_c - c_\beta & 0 & 0 \\ c_\beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\text{Et } c_h = \frac{\dot{m}_h}{\tau_h^* \dot{m}_h^*}, c_\alpha = \frac{\alpha^*}{2\tau_h^*} \gamma_U, c_c = \frac{\dot{m}_c}{\tau_c^* \dot{m}_c^*}, c_\beta = \frac{\beta^*}{2\tau_c^*} \gamma_U$$

$$\dot{m}_h^* = 0.1083 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, \dot{m}_c^* = 0.1803 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}, \tau_h^* = 7.7392 \text{s},$$

$\tau_c^* = 8.3502 \text{s}$ sont des paramètres dépendants de l'échangeur thermique particulier.

Le modèle physique du système est donc représenté sous la forme suivante en utilisant que deux sections.

On introduit, enfin, le paramètre γ_U défini par :

$$\gamma_U = \frac{(\dot{m}_h \dot{m}_c)^y (\dot{m}_c^{*y} + e \dot{m}_h^{*y})}{(\dot{m}_h^* \dot{m}_c^*)^y (\dot{m}_c^y + e \dot{m}_h^y)}$$

$$y = 0.8 \text{ et } e = \frac{A_h K_h}{A_c K_c} \approx 1.11 \text{ représentent des paramètres}$$

relatifs aux régimes de flux (les écoulements turbulents) et dépendent de la géométrie de l'échangeur.

Nous connaissons, grâce aux données fournies par les thermiciens, les différents domaines de variations des variables suivantes :

$$\alpha^*, \beta^* \in [0, 2]; T_{h,i}, T_{c,i} \in [0.4, 1]; \dot{m}_h, \dot{m}_c \in [0.4, 1]$$

Pour finir, on peut noter que le modèle est non-linéaire car il y a des produits de différents termes entre l'entrée et l'état des variables et plus précisément qu'il est bilinéaire.

Le problème considéré ici est l'estimation des paramètres α^* et β^* à partir des données entrées/sorties et du modèle développé. Nous pourrions ainsi à l'aide de ces paramètres pouvoir estimer la valeur de l'encrassement et ainsi savoir quand l'encrassement augmentera, seulement à partir des données de températures et des débits. Nous allons voir différentes solutions apportées à ce problème.

III. OBSERVATEUR ASSOCIÉ À UNE FONCTION DE LYAPUNOV

Un observateur est mis en place en utilisant une méthode basée sur les fonctions de Lyapunov afin de prouver la convergence de l'erreur vers zéro. Afin d'atteindre cet objectif, on va réécrire le système sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(u)x + F(\alpha, \beta)x + b(u, \alpha, \beta) + B(u) \\ \dot{\alpha} = 0 \\ \dot{\beta} = 0 \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

Avec :

$$A(u) = \begin{pmatrix} -u_2 & 0 & 0 & 0 \\ u_2 & -u_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -u_4 & 0 \\ 0 & 0 & u_4 & -u_4 \end{pmatrix}$$

$$F(\alpha, \beta) = \gamma \begin{pmatrix} -\alpha & 0 & \alpha & \alpha \\ -\alpha & -\alpha & \alpha & 0 \\ \beta & \beta & -\beta & 0 \\ \beta & 0 & -\beta & -\beta \end{pmatrix}$$

$$b(u, \alpha, \beta) = \begin{pmatrix} -\gamma\alpha u_1 \\ \gamma\alpha u_3 \\ -\gamma\beta u_3 \\ \gamma\beta u_1 \end{pmatrix} \quad B(u) = \begin{pmatrix} u_2 u_1 \\ 0 \\ u_4 u_3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\gamma = \gamma_U \text{ et } u = [T_{h,in} \ T_{c,in} \ \dot{m}_h \ \dot{m}_c]^T = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T.$$

L'observateur sera mis sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A(u)\hat{x} + F(\hat{\alpha}, \hat{\beta})\hat{x} + b(u, \hat{\alpha}, \hat{\beta}) + B(u) \\ \quad + K(u)(y - C\hat{x}) + L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})(y - C\hat{x}) \\ \dot{\hat{\alpha}} = g_1(u, y, \hat{x}) \\ \dot{\hat{\beta}} = g_2(u, y, \hat{x}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (6)$$

Avec :

- le gain $K(u)$, dépendant des entrées, est choisi tel que $A(u) - K(u)C$ soit stable.
- le gain $L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ est choisi tel que $F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C$ soit stable.
- les fonctions $g_1(u, y, \hat{x})$ et $g_2(u, y, \hat{x})$ sont à déterminer.

A. Calcul du gain $K(u)$

On choisit $K(u)$ tel que :

$$(A(u) - K(u)C) + (A(u) - K(u)C)^T < 0 \quad (7)$$

Nous prenons :

$$K(u) = \begin{pmatrix} k_1 & k_5 \\ k_2 & k_6 \\ k_3 & k_7 \\ k_4 & k_8 \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} k_1 = u_2; k_3 = k_5 = 0; \\ k_6 = -k_4; k_7 = u_4; \\ k_2, k_8 > 0 \end{cases}$$

Certains gains (si l'on peut) seront fixés à 0 afin de simplifier la matrice et de faciliter la recherche des autres gains pour obtenir une matrice définie positive. On s'arrange donc pour avoir tout les termes de la diagonale négatifs.

B. Calcul du gain $L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$

On choisit $L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ tel que :

$$(F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C) + (F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C)^T < 0 \quad (10)$$

Nous choisissons dans notre cas les valeurs des gains suivant :

$$L(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \begin{pmatrix} l_1 & l_5 \\ l_2 & l_6 \\ l_3 & l_7 \\ l_4 & l_8 \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} l_1 = -\hat{\alpha}; l_2 = \hat{\beta}; \\ l_7 = -\hat{\beta}; l_6 = -l_4 = 0; \\ l_5 = \hat{\alpha} + \hat{\beta}; l_3 = \hat{\alpha} + \hat{\beta}; \\ l_8 = \hat{\alpha} \end{cases}$$

C. Détermination des fonctions $g_1(u, y, \hat{x})$ et $g_2(u, y, \hat{x})$

Pour les fonctions $g_1(u, y, \hat{x})$ et $g_2(u, y, \hat{x})$ qui sont à déterminer, on calcule les erreurs dynamiques de l'observateur :

$$\varepsilon = x - \hat{x} \text{ et } \xi = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha - \hat{\alpha} \\ \beta - \hat{\beta} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon} = \{A(u) - K(u)C\}\varepsilon + \{F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C\}\varepsilon + \{F(\alpha, \beta) - F(\hat{\alpha}, \hat{\beta})\}x + \{b(u, \alpha, \beta) - b(u, \hat{\alpha}, \hat{\beta})\} \quad (9)$$

On pose :

$$\begin{cases} \{F(\alpha, \beta) - F(\hat{\alpha}, \hat{\beta})\} = F(\xi_1, \xi_2) \\ \{b(u, \alpha, \beta) - b(u, \hat{\alpha}, \hat{\beta})\} = b(u, \xi_1, \xi_2) \end{cases}$$

On obtient donc les erreurs dynamiques suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = \{A(u) - K(u)C\}\varepsilon + \{F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C\}\varepsilon + F(\xi_1, \xi_2)x + b(u, \xi_1, \xi_2) \\ \dot{\xi}_1 = -g_1(u, y, \hat{x}) \\ \dot{\xi}_2 = -g_2(u, y, \hat{x}) \end{cases} \quad (10)$$

On va ensuite utiliser l'équation (10) et la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(\varepsilon) = \varepsilon^T \varepsilon + \gamma \xi^T \xi \quad (11)$$

Pour que l'erreur tende vers 0 et donc que $V(\varepsilon)$ tende vers 0, une condition suffisante est que :

$$\dot{V}(\varepsilon) < 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon) &= \varepsilon^T \dot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon}^T \varepsilon + \gamma \xi^T \dot{\xi} + \gamma \dot{\xi}^T \xi \\ &= -\varepsilon^T Q \varepsilon - \varepsilon^T S \varepsilon + 2\varepsilon^T F(\xi_1, \xi_2)x + 2\varepsilon^T b + 2\gamma \xi^T \dot{\xi} \end{aligned} \quad (13)$$

Avec

$$(A(u) - K(u)C) + (A(u) - K(u)C)^T = -Q$$

$$(F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C) + (F(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) - L(\hat{\alpha}, \hat{\beta})C)^T = -S$$

Dans l'expression (16) il nous reste à prouver la négativité de $2\varepsilon^T F(\xi_1, \xi_2)x + 2\varepsilon^T b + 2\gamma \xi^T \dot{\xi}$ sachant que $-Q$ et $-S$ sont tout les deux définis négatifs comme nous l'avons vu précédemment.

$$\begin{aligned} &2\varepsilon^T Fx + 2\varepsilon^T b + 2\gamma \xi^T \dot{\xi} \\ &= 2\gamma \xi_1^T (\dot{\xi}_1 + \varepsilon_2 u_3 - \varepsilon_2 x_2) - 2\gamma \xi_2^T (\dot{\xi}_2 + \varepsilon_4 u_1 - \varepsilon_4 x_4) \\ &\quad + 2\gamma (-x_1 \varepsilon_1 + x_3 \varepsilon_1 + x_4 \varepsilon_1 - x_1 \varepsilon_2 + x_3 \varepsilon_2) \xi_1 \\ &\quad + 2\gamma (x_1 \varepsilon_3 + x_2 \varepsilon_3 - x_3 \varepsilon_3 + x_1 \varepsilon_4 - x_3 \varepsilon_4) \xi_2 \\ &\quad - 2\gamma (\varepsilon_1 u_1 \xi_4 + \varepsilon_3 u_3 \xi_2) \end{aligned} \quad (14)$$

$-2\gamma (\varepsilon_1 u_1 \xi_4 + \varepsilon_3 u_3 \xi_2) < 0$ est vérifié.

Pour que

$$2\gamma \xi_1^T (\dot{\xi}_1 + \varepsilon_2 u_3 - \varepsilon_2 x_2) - 2\gamma \xi_2^T (\dot{\xi}_2 + \varepsilon_4 u_1 - \varepsilon_4 x_4) < 0$$

Il faut avoir $\dot{\xi}_1 + \varepsilon_2 u_3 - \varepsilon_2 x_2 = 0$ et $\dot{\xi}_2 + \varepsilon_4 u_1 - \varepsilon_4 x_4 = 0$.

Nous avons ainsi:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \varepsilon_2 (-u_3 + x_2) \\ \dot{\xi}_2 &= \varepsilon_4 (-u_1 + x_4) \end{aligned} \quad (15)$$

Sachant que $\dot{\xi}_1 = -\hat{\alpha}$ et $\dot{\xi}_2 = -\hat{\beta}$ alors :

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} &= \varepsilon_2 (u_3 - x_2) = (y_1 - \hat{x}_2)(u_3 - x_2) = g_1(u, y, \hat{x}) \\ \hat{\beta} &= \varepsilon_4 (u_1 - x_4) = (y_2 - \hat{x}_4)(u_1 - x_4) = g_2(u, y, \hat{x}) \end{aligned} \quad (16)$$

Il reste les termes $2\gamma(-x_1 \varepsilon_1 + x_3 \varepsilon_1 + x_4 \varepsilon_1 - x_1 \varepsilon_2 + x_3 \varepsilon_2) \xi_1$ et $2\gamma(x_1 \varepsilon_3 + x_2 \varepsilon_3 - x_3 \varepsilon_3 + x_1 \varepsilon_4 - x_3 \varepsilon_4) \xi_2$ qui peuvent se compenser. En effet, dû au caractère bilinéaire du terme restant $2\varepsilon^T F(\xi_1, \xi_2)x + 2\varepsilon^T b$. On peut montrer qu'il existe un terme constant $c_1 > 0$ tel que :

$$|\varepsilon^T F(\xi_1, \xi_2)x + 2\varepsilon^T b| < c_1 \|\varepsilon\| \|\xi\| \quad (17)$$

Nous pouvons dire que :

$$2\|\varepsilon\| \|\xi\| \leq \rho \|\varepsilon\|^2 + \frac{1}{\rho} \|\xi\|^2 \quad (18)$$

avec $\rho > 0$

Nous avons alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon) &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|\varepsilon\|^2 - \lambda_{\min}(S) \|\varepsilon\|^2 + c\rho \|\varepsilon\|^2 + \frac{c}{\rho} \|\xi\|^2 \\ &\leq -(\lambda_{\min}(Q) + \lambda_{\min}(S) - c\rho) \|\varepsilon\|^2 + \frac{c}{\rho} \|\xi\|^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Pour avoir l'erreur qui tende vers 0 et donc que $\dot{V}(\varepsilon) < 0$ il suffit de choisir les gains k_2, k_8 grand et ρ petit afin d'obtenir $\lambda_{\min}(Q) + \lambda_{\min}(S) > c\rho$.

On peut aussi choisir la constante ρ assez grande afin de minimiser l'effet de $\|\xi\|$.

Finalement en tenant compte des différentes contraintes sur les gains nous obtenons un observateur asymptotique.

L'observateur à grand gain sera donc représenté sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = u_2 (u_1 - \hat{x}_1) + \gamma_u \hat{\alpha} (\hat{x}_3 + \hat{x}_4 - \hat{x}_1 - u_1) \\ \quad + (u_2 - \gamma_u \hat{\alpha})(y_1 - \hat{x}_2) + \gamma_u (\hat{\alpha} + \hat{\beta})(y_2 - \hat{x}_4) \\ \dot{\hat{x}}_2 = u_2 (\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + \gamma_u \hat{\alpha} (-\hat{x}_1 - \hat{x}_2 + \hat{x}_3 + u_3) \\ \quad + (k_2 + \gamma_u \hat{\beta})(y_1 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{x}}_3 = u_4 (u_2 - \hat{x}_3) + \gamma_u \beta (\hat{x}_1 + \hat{x}_2 - \hat{x}_3 - u_3) \\ \quad + \gamma_u (\hat{\alpha} + \hat{\beta})(y_1 - \hat{x}_2) + (u_4 - \gamma_u \hat{\beta})(y_2 - \hat{x}_4) \\ \dot{\hat{x}}_4 = u_4 (\hat{x}_3 - \hat{x}_4) + \gamma_u \beta (\hat{x}_1 - \hat{x}_3 - \hat{x}_4 + u_1) \\ \quad + (k_8 + \gamma_u \hat{\alpha})(y_2 - \hat{x}_4) \\ \dot{\hat{\alpha}} = (u_3 - y_1)(y_1 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{\beta}} = (u_1 - y_2)(y_2 - \hat{x}_4) \end{cases} \quad (20)$$

Avec $k_2, k_8 > 0$.

D. Résultats

Les simulations ont été réalisées sur 2 essais utilisés dans [6] et [7]. Le premier essai dure 54644s et le second 28880s. Pour les deux essais, l'encrassement commence au alentours des 2/3 de la durée de l'essai.

Les entrées de l'échangeur thermique sont choisies aléatoirement mais l'encrassement est le même pour les deux essais. Il est représenté par la conductivité thermique du tube intérieur qui est modifié artificiellement et est représenté sur la figure 3. Ce dernier est défini comme le rapport d'un nombre d'échantillons à un nombre total d'échantillons durant la période d'encrassement. Les facteurs d'encrassement standard pour des échangeurs thermiques d'eau à eau sont exposés (par exemple [3],[4]) et la correspondance d'une période sans dimension est donnée.

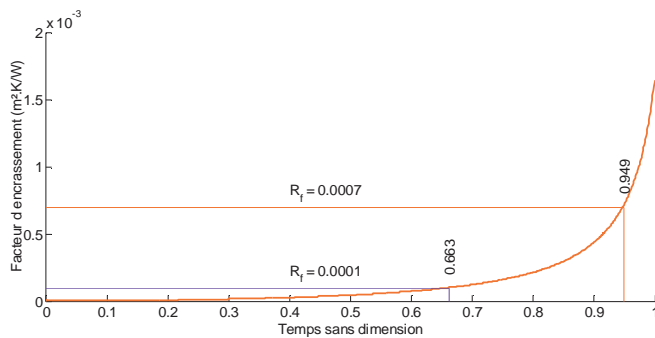


Fig. 3. Facteur d'encrassement pour les deux essais

Ce paramètre, ainsi que toutes les données obtenues ont été implanté et simulé à partir du logiciel de simulation Fluent [2]. Ce paramètre n'intervient pas directement dans le modèle décrit par (3). En effet, la relation entre le facteur d'encrassement et les paramètres α et β est complexe. Le facteur d'encrassement est grossièrement égal à $\lambda = (1 / \alpha) + (1 / \beta)$.

Pour l'observation des paramètres liés à l'encrassement, les

Pour l'observation des paramètres liés à l'encrassement, les deux essais seront représentés avec une échelle des temps unitaire normalisée afin de pouvoir comparer les résultats. La figure 4 présente l'observation du paramètre $\hat{\alpha}$ et la figure 5 le paramètre $\hat{\beta}$.

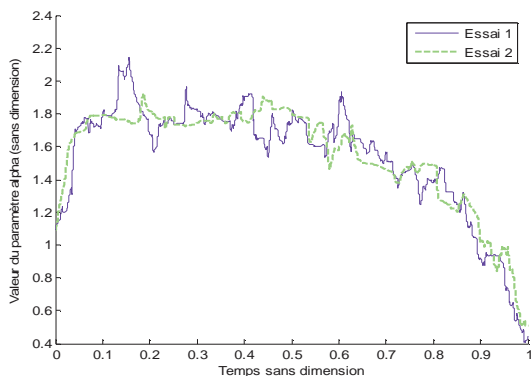


Fig. 4. Représentation de $\hat{\alpha}$ sur 2 essais

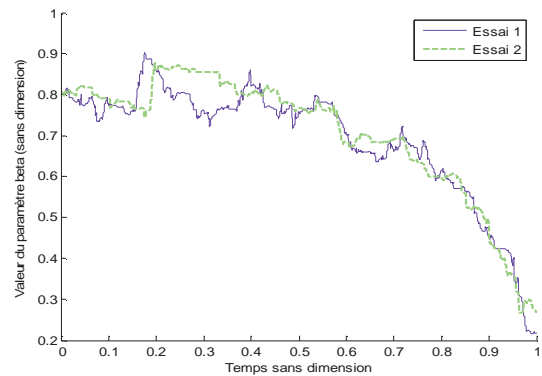


Fig. 5. Représentation de $\hat{\beta}$ sur 2 essais

On peut voir ici que les deux essais sont similaires ce qui permet de dire que cette méthode fonctionne sur différentes données. Pour vérifier si les résultats suivent la réalité, on va comparer les données de température connue (les températures en sortie de l'échangeur thermique) avec celles estimées sur les figures 6 et 7. On les comparera sur l'essai 2.

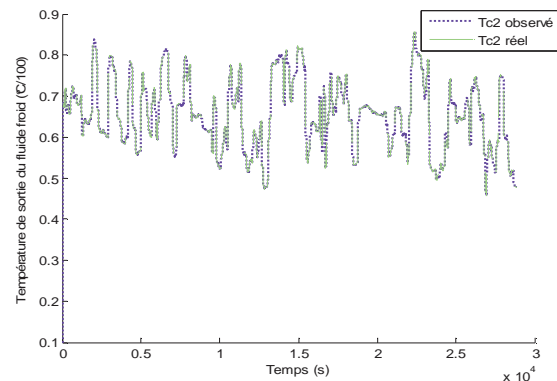


Fig. 6. Comparaison de la température de sortie du fluide froid du système réel et de l'observateur sur l'essai 2

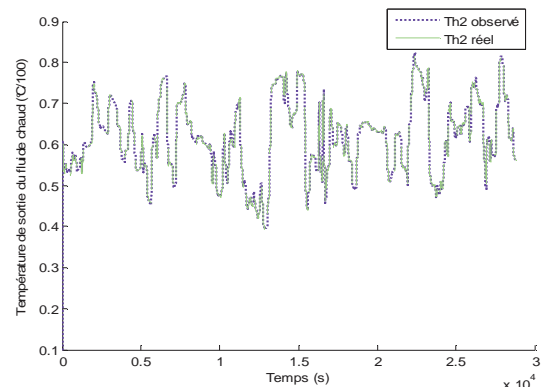


Fig. 7. Comparaison de la température de sortie du fluide chaud du système réel et de l'observateur sur l'essai 2

Nous pouvons constater que les deux températures sont similaires donc que l'observateur est correct. Sur les figures 8 et 9 nous pouvons voir que les erreurs relatives à ces températures sont minimales, elles sont inférieures à 2.5%.

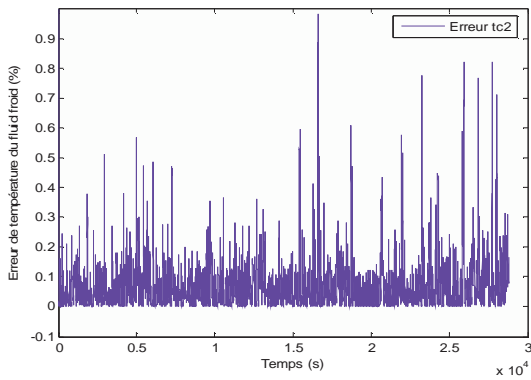


Fig. 8. Erreur relative entre la température du fluide froid de sortie du système réel et la température estimée de l'observateur

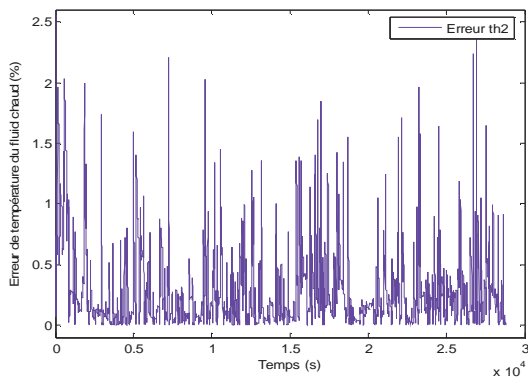


Fig. 9. Erreur relative entre la température du fluide chaud de sortie du système réel et la température estimée de l'observateur

Nous traçons maintenant à la figure 10 le terme :

$\frac{1}{\hat{\alpha}} + \frac{1}{\hat{\beta}}$, qui a une évolution semblable à l'encrassement de la figure 3.

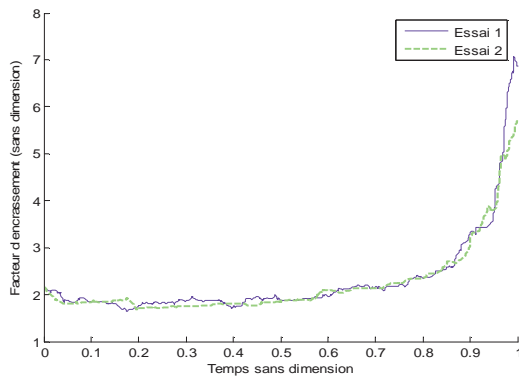


Fig. 10. Facteur d'encrassement sur les 2 essais

On remarque ainsi que l'encrassement débute bien comme on le souhaitait c'est-à-dire au 2/3 de la simulation. Les résultats de ces deux essais sont équivalents et sont similaires à la figure 3 qui représentait l'encrassement. On peut ainsi dire que l'encrassement est détectable (et aussi sa valeur est estimable) avec cette méthode.

Nous pouvons voir sur la figure suivante une comparaison de cet observateur et de la méthode développée dans [1] utilisant une batterie d'observateur.

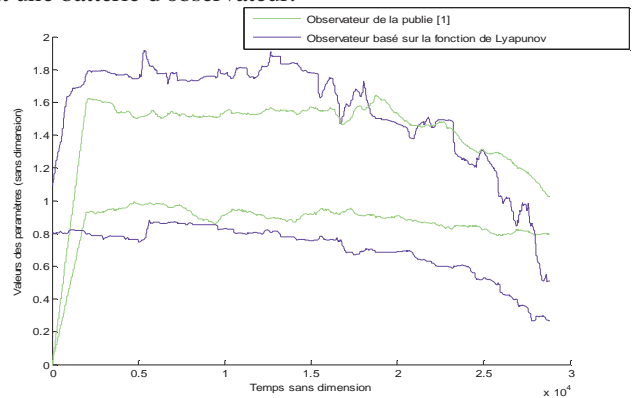


Fig. 11. Comparaison de cette méthode avec la méthode présentée en [1]

Nous pouvons ainsi voir que pour α et β nos courbes diminuent en fonction de l'encrassement, alors que pour les résultats de la publie [1] il n'y a que α qui diminue à la fin. De plus [1] utilise un filtre après la simulation de la batterie d'observateurs alors que pour nous un seul observateur est utilisé sans filtre.

IV. CONCLUSION

Ce papier a présenté une nouvelle technique pour la détection de l'encrassement en utilisant le modèle présenté dans [6]. Nous avons pu voir que les résultats avec cette méthode sont meilleurs que pour la méthode de [1] qui utilise des observateurs flous. Ici un seul observateur est utilisé et une preuve de la convergence de l'observateur est démontrée.

Le caractère bilinéaire du système nous a permis d'utiliser cette méthode de décomposition de l'observateur et ainsi pouvoir prouver la stabilité bout par bout.

RÉFÉRENCES

- [1] Delmotte F., Delrot S., Lalot S. et Dambrina M. Fouling Detection in Heat Exchangers with Fuzzy Models. 19th International Symposium on Transport Phenomena, Iceland, 15-18 august 2008.
- [2] Fluent Flow Modeling Software, at <http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>
- [3] http://www.engineeringpage.com/technology/thermal/fouling_factors.html
- [4] Incropera F.P., DeWitt D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fifth ed., John Wiley&Sons,2001.
- [5] Jonsson G. R. Parameter estimation in models of heat exchangers and geothermal reservoirs. Ph.D. thesis, Department of Mathematical Statistics, Lund Institute of Technology, 1990.
- [6] Jonsson G. R., Lalot S., Palsson O. P. et Desmet B. Use of extended Kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2643-2655, 2007.
- [7] Lalot S., Palsson O. P., Jonsson G. R. et Desmet B. Comparison of neural networks and Kalman filters performances for fouling detection in a heat exchanger. *International Journal of Heat Exchangers*, Vol VIII, 1524-5608, pp. 151-168, 2007.
- [8] Wolverine Tube, Inc. *Wolverine engineering databook II*. Electronic distribution, Research and development team, 2001.